

Санкт-Петербургский государственный университет

Фундаментальная математика и механика

Механика деформируемого твердого тела

Демидова Елена Сергеевна 

Обратимая деформация биметаллических композитов «TiNi-BT6» и
«TiNi-бронза» с памятью формы

Дипломная работа

Научный руководитель:

Доцент кафедры физической механики,

д.ф.м.н.Реснина Н.Н.

Рецензент:

Доцент кафедры Прочность материалов и конструкций ПГУПС,

к.ф.м.н.Кухарева А.С.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Fundamental Mechanics and Mathematics

Mechanics of solid deformable body

Demidova Elena



Recoverable strain in “TiNi-Ti-6Al-4V” and “TiNi-bronze” shape memory bimetal
composites

Graduation Thesis

Scientific supervisor:

Associate Professor of Physical Mechanics Department,

Doctor of Physics and Mathematics Natalia Resnina

Reviewer:

Associate Professor of Strength of Materials and Constructions Department, PGUPS

Candidate of Physics and Mathematics Anna Kukhaeva

Saint-Petersburg

2016

Содержание

Введение	4
Глава 1. Обзор литературы	6
1.1. Сплавы с эффектом памяти формы	6
1.2. Термомеханические актуаторы с эффектом памяти формы	11
1.3. Биметаллические композиты с эффектом памяти формы	13
Глава 2. Цели и методики работы	16
2.1. Цели исследования	16
2.2. Объекты и методики исследования	18
Глава 3. Результаты исследования	21
3.1. Исследование структуры биметаллических композитов «TiNi- BT6» и «TiNi-бронза»	21
3.2. Мартенситные превращения в биметаллических композитах	26
3.3. Обратимая деформация в биметаллических композитах «TiNi- BT6» и «TiNi-бронза»	29
3.3.1. Влияние предварительной деформации на обратимую деформацию в композитах «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза»	29
3.3.2. Влияние упругого слоя на обратимую деформацию композитов «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза»	35
Выводы	37
Список использованной литературы	39

Введение

Одним из перспективных применений сплавов с памятью формы являются термомеханические приводы многократного действия. При изменении температуры эти устройства способны многократно обратимо изменять деформацию и усилия [7]. Обычно термомеханические приводы состоят из двух элементов – активного сплава с памятью формы и пассивного упругого элемента [5]. При создании таких устройств необходимо решить ряд технических задач связанных с соединением двух разнородных тел, обеспечением одинаковых условий изменения температуры для активного и пассивного слоев, компактностью устройства. Все эти проблемы могут быть решены, если термомеханический привод создан на базе биметаллического композита, один из слоев которого является сплавом с памятью формы, а другой – упругим телом. Получают такие композиты сваркой взрывом и к настоящему моменту уже получены композиты на основе сплава с памятью формы TiNi, в которых в качестве пассивного слоя выступали сталь и сплав TiNi заникеленного состава, проявляющий псевдоупругие свойства. Вместе с тем, установлено, что основным недостатком этих композитов является то, что величина обратимой деформации не превосходит 1 %, тогда как в обычных приводах это значение может достигать 5 - 10 %. Поэтому очень актуальной задачей является разработка биметаллических композитов с памятью формы, которые способны проявлять обратимую деформацию большую, чем 1 %. Решению данной задачи посвящена настоящая работа.

Обратимое изменение деформации биметаллического композита определяется параметрами упругого слоя – величиной упругой деформации, поэтому можно предположить, что использование в качестве пассивного слоя сплавов с большей упругой деформацией позволит получить композиты с большей обратимой деформацией. Анализ упругих характеристик большого количества различных сплавов показал, что наиболее оптимальными для

применения в качестве пассивного слоя являются бериллиевая бронза и сплав ВТ6. Однако композиты с памятью формы, в которых в качестве пассивного слоя были выбраны эти два сплава, до сих пор не были разработаны, а их свойства не были изучены. Вместе с тем применение композитов с памятью формы с высокой обратимой деформацией позволило бы существенно расширить область применения сплавов с памятью формы и решить сложные технические задачи. Биметаллические композиты «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6» были получены сваркой взрывом в г. Витебске (Беларусь). Целью настоящей работы явилось изучение структуры, мартенситных превращений и обратимого формоизменения в этих новых композитах «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6».

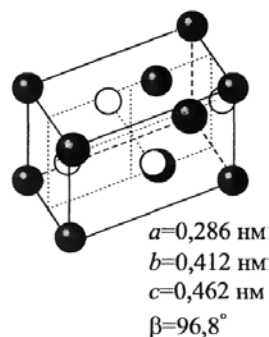
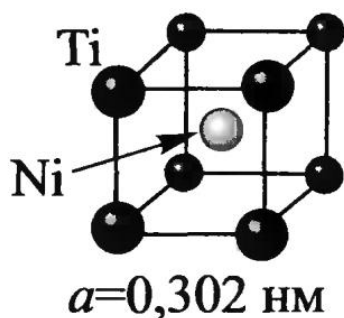
Глава 1. Обзор литературы

1.1 Сплавы с эффектом памяти формы.

Сплавы с эффектом памяти формы характеризуются тем, что способны восстанавливать остаточную деформацию при определенных условиях. Такое явление обратимости больших неупругих деформаций обусловлено необычными структурными перестройками материала, а именно термоупругими мартенситными превращениями [1].

Мартенситное превращение представляет собой бездиффузионный кооперативный сдвиг атомов в кристаллической решетке на расстояния не превосходящие межатомные. Таким образом, в результате мартенситного превращения материал испытывает трансформацию кристаллической структуры из одной фазы в другую, причем такое превращение носит термоупругий характер. Термоупругим называется такое превращение, которое происходит под действием изменения температуры и (или) поля напряжения и является полностью обратимым [2].

Для сплавов с эффектом памяти формы, в частности для TiNi, при высоких температурах характерна кристаллическая решетка типа B2: кубическая, упорядоченная по типу CsCl (Рис. 1 а). Такую фазу принято



а) б)
Рис.1 Кристаллическое строение сплава TiNi: аустенитная (высокотемпературная) фаза (а) и мартенситная (низкотемпературная) фаза (б) [3].

называть аустенитной. При низких температурах материал обладает кристаллической структурой типа B19' – орторомбической решеткой с моноклинным искажением (рис. 1 б). Это состояние называется мартенситным [4].

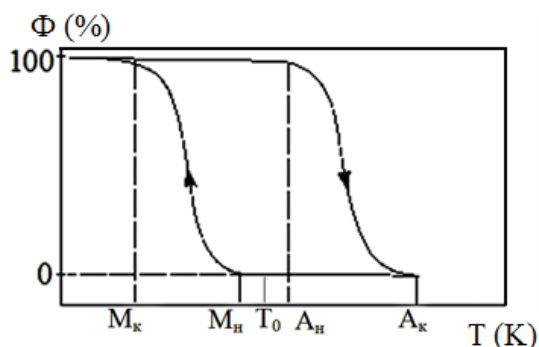


Рис.2 Зависимость относительного количества фазы мартенсита от температуры (стрелками указано направление изменения температуры).

На рис. 2 изображена зависимость относительного количества фазы мартенсита Φ от температуры. При охлаждении материала из аустенитного состояния (т.е. находящегося при температуре выше A_k) до температуры M_n ничего не происходит, однако при

достижении этой температуры начинают появляться кристаллы мартенсита. Как только температура доходит до температуры M_k , материал полностью переходит в мартенситную фазу, т.е. кристаллы мартенсита заполняют весь объем. Такое превращение принято называть прямым мартенситным переходом. При нагреве происходит обратное превращение за счет обратного движения межфазных границ, т.е.: при температуре A_n исчезают первые кристаллы мартенсита, а при достижении A_k весь материал переходит в высокотемпературную фазу [2]. Параметры мартенситных превращений, такие как последовательность и характеристические температуры начала и окончания прямого и обратного переходов (M_n , M_k , A_n , A_k) зависят от структуры, химического состава сплава, предварительной обработки материала (термообработки, предварительного деформирования) и других факторов[5].

Стоит отметить, что возникновение каждого кристалла новой фазы сопровождается сдвиговой деформацией превращенной микрообласти, однако, в силу статистического характера зарождения и роста кристаллов мартенсита

вероятность реализации разных вариантов сдвига одинакова и эти микродеформации в разных кристаллах различны в смысле ориентации направления сдвига и плоскости сдвига. Таким образом, микродеформации решетки взаимно компенсируются, и макроскопической деформации не наблюдается [6].

Благодаря тому, что переход из аустенитной фазы в мартенситную сопровождается сдвигом, сплавы, испытывающие термоупругие мартенситные превращения, обладают рядом уникальных свойств, таких как эффект памяти формы, пластичность превращения, псевдоупругость и другие. Рассмотрим их подробнее.

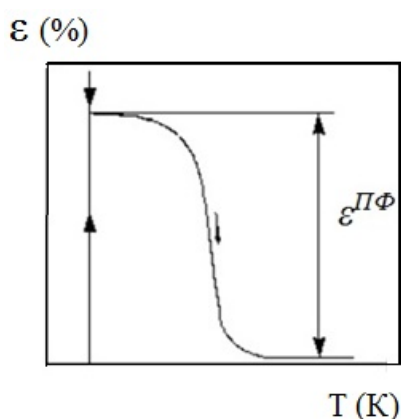


Рис.3 Зависимость $\varepsilon(T)$, наблюдаемая при реализации эффекта памяти формы.

В зависимости от воздействия температуры и механических нагрузок, мартенситные превращения могут существенно влиять на деформацию материала [5]. Если материал, деформированный при низких температурах (т.е. в мартенситной фазе), нагревать, то в результате обратного мартенситного перехода произойдет восстановление кристаллической структуры, а вместе с этим и восстановление соответствующих микродеформаций. Это приводит к полному восстановлению макроскопической деформации. Такое явление возврата неупругих деформаций называют эффектом памяти формы.

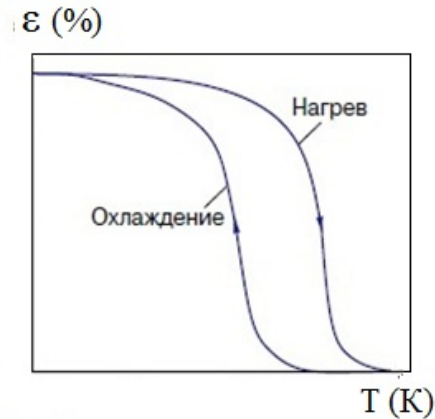


Рис.4 Зависимость $\varepsilon(T)$, наблюдаемая при реализации эффекта обратимой памяти формы.

Эффект памяти формы является однократным и для того, чтобы его еще раз повторить необходимо охладить сплав и вновь его продеформировать в мартенситном состоянии. Вместе с тем, при определенных условиях в сплавах с памятью формы можно наблюдать многократное изменение деформации – это эффект обратимой памяти формы. Суть этого эффекта заключается в том, что при циклическом нагреве и охлаждении материала через интервал мартенситных превращений, происходит обратимое изменение деформации при охлаждении и нагревании (Рис. 4). Однако, для реализации данного эффекта в материале должны присутствовать внутренние поля ориентированных напряжений, которые при охлаждении действуют как внешние. Эти напряжения обычно задаются путем предварительного деформирования сплава [6].

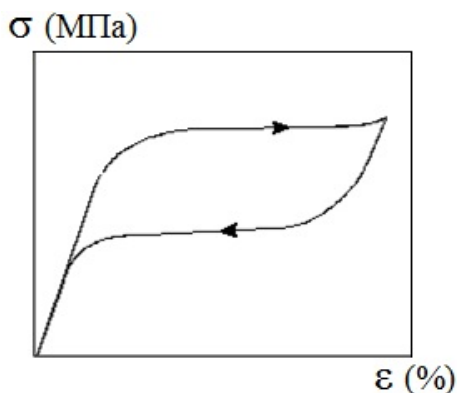


Рис.5 Диаграмма напряжение-деформация в случае реализации эффекта псевдоупругости.

Еще одним важным свойством является эффект пластичности превращения, который заключается в том, что при охлаждении материала, под нагрузкой через интервал температур прямого превращения, в нем будут образовываться кристаллографические варианты мартенсита определенного вида, а именно кристаллы, сдвиговая деформация которых сонаправлена нагрузке, что будет приводить к накоплению макроскопической деформации. Поскольку эта деформация

появляется вследствие возникновения благоприятно ориентированных кристаллов мартенсита, то она является обратимой, т.е. при нагревании, она будет исчезать при исчезновении кристаллов мартенсита в процессе обратного мартенситного перехода [2].

Обычно мартенситные превращения происходят при изменении температуры в определенном интервале, однако их можно инициировать и увеличением нагрузки. Если прикладывать к сплаву, нагрузку, то характеристические температуры превращений (M_n , M_k , A_n , A_k) будут повышаться (в соответствии с термодинамическим уравнением Клазиуса-Клапейрона) [6]. Рассмотрим случай, когда температура деформирования T_d выше температуры окончания обратного перехода A_k . При определенной нагрузке температура M_n достигнет T_d или превзойдет ее, тогда начнется прямое превращение, то есть появится мартенсит, наведенный механическими напряжениями. Однако такой мартенсит неустойчив, и при снятии нагрузки характеристические температуры вернуться к обычным значениям, а мартенситная фаза перейдет в аустенитную, и вся приобретенная деформация полностью вернется. Такое свойство материалов с эффектом памяти формы называют эффектом псевдоупругости (Рис. 5).

Благодаря перечисленным функциональным свойствам сплавы с эффектом памяти формы широко используются в различных областях, например, в медицине, электронике, робототехнике, строительстве. В частности, материалы с эффектом памяти формы используют в качестве силового элемента различного рода приводов.

1.2. Термомеханические актуаторы с эффектом памяти формы.

Актуатор можно определить как устройство, которое энергию (электрическую, магнитную, тепловую) в механическую работу. Помимо способности совершать работу, актуаторы должны обладать хорошими демпфирующими свойствами, быстро реагировать на изменения системы, быть легко управляемыми, обладать способностью совершать движение в двух направлениях [5].

Среди приводов (актуаторов) важную роль играют термоактуаторы – устройства, преобразующие тепловую энергию в механическую путем создания поля напряжений или перемещений. Наиболее распространенными термоприводами являются биметаллические и восковые. Обычные биметаллические термоактуаторы представляют собой соединение двух и более металлов с разными коэффициентами температурного расширения. Когда такой термоактуатор нагревают или охлаждают, он изгибается в направлении, перпендикулярном слою с меньшим коэффициентом температурного расширения. Такие термоприводы обладают рядом существенных недостатков: величина изгиба таких устройств достигает небольших значений, развиваемые в них усилия невелики, а допустимая геометрическая форма таких приводов имеет ряд ограничений, зависящих от способа соединения металлов [7].

Действие восковых термоактуаторов основано на том, что воск обладает большим коэффициентом температурного расширения и переходит в жидкое состояние при сравнительно

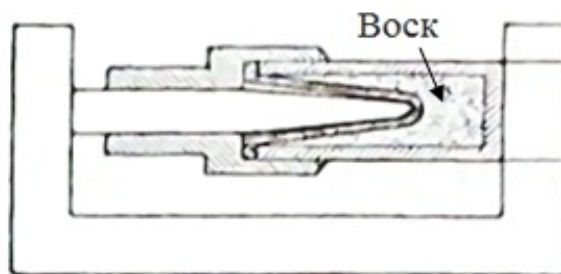


Рис.6 Схема воскового актуатора [7]

небольших температурах, что сопровождается увеличением действия другого элемента термопривода. При охлаждении воск застывает, за счет этого действие второго элемента уменьшается. Схема восковых актуаторов представлена на рис.6. Перемещения, развивающиеся в таких устройствах, больше, чем в биметаллических актуаторах, но за счет того, что воск должен быть заключен в капсулу, уменьшается теплопроводимость термопривода, что приводит к медленному реагированию на изменение температуры [7].

В настоящее время активно исследуются композиционные материалы на основе сплавов с эффектом памяти формы. Термоактуаторы на основе таких материалов генерируют поле напряжений или деформаций за счет реализации эффекта памяти формы. Чаще всего наряду с эффектом памяти формы используется эффект обратимой деформации: такие термоактуаторы состоят из функционального (сплав с эффектом памяти формы) и упругого элементов. За счет реализации эффекта памяти формы в функциональном элементе при нагреве деформируется упругий элемент, вследствие чего в системе возникают внутренние напряжения. Эти напряжения приводят к накоплению так называемой обратимой деформации при последующем охлаждении. Таким образом, актуатор совершает самопроизвольное движение в противоположные стороны в зависимости от нагрева или охлаждения [7].

В отличие от обычных биметаллических актуаторов, термоприводы на основе сплавов с эффектом памяти формы развивают достаточно большие напряжения и перемещения, при этом термоактуаторы с эффектом памяти формы быстро реагируют на изменение температуры, нечувствительны к многим воздействиям окружающей среды, позволяют обеспечить высокую точность движения, могут совершать не только прямолинейное движение, но и вращательное, работать на сжатие, удлинение, изгиб [7]. Все эти преимущества делают актуаторы с эффектом памяти формы более удобными и выгодными для производства.

1.3. Биметаллические композиты с эффектом памяти формы.

На основе сплавов с эффектом памяти формы разработаны различные варианты термоприводов, среди которых особый интерес для электротехники представляют биметаллические композиты. В настоящее время существует множество способов получения биметаллических композитов, например, дуговая сварка, лучевая сварка, лазерная сварка, пайка и другие. Однако большинство этих методов приводит к деградации эффектов памяти формы, пластичности превращений, обратимой памяти формы, а так же к сдвигу температур мартенситных превращений. Кроме того, материалы, полученные такими методами, обладают хрупким швом и зачастую содержат частицы вторичных фаз в области сварного шва. Попытки избежать этих недостатков приводят к ухудшению свойств материала, а так же к усложнению методики.

Одним из новых методов получения биметаллов является сварка взрывом. Такой метод позволяет получить композит с достаточно прочным швом, без вторичных фаз, а главное температурный интервал мартенситных превращений и эффекты памяти формы совпадают с аналогичными величинами, свойственными функциональному слою до сварки [8].

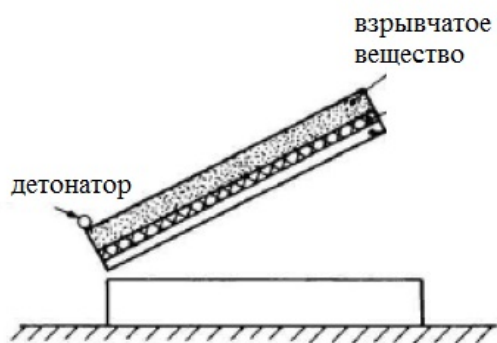


Рис.7 Схема сварки взрывом [9]

Сварка взрывом - это метод соединения металлов в твердом состоянии, использующий энергию взрыва для создания металлической связи между компонентами композита. На рис. 7 представлена схема проведения такой сварки:

пластина из сплава с эффектом памяти формы (TiNi) располагается под углом к горизонтально расположенному упругому слою. На пластину TiNi наносится слой взрывчатого вещества и детонатор. В результате контролируемого взрыва

происходит соударение пластин с большой скоростью и за счет совместной пластической деформации поверхностей образуется прочное соединение двух и более пластин [9].

В отличие от других методов, сварка взрывом позволяет получить биметаллический композит, слои которого обладают различными свойствами, так как за счет скоротечности процесса не успевает протечь объемная диффузия [10]. Благодаря этому свойству, а так же тому, что сварка взрывом сохраняет параметры мартенситных превращений и не приводит к ухудшению свойств функционального слоя, именно этот метод был выбран для получения биметаллических композитов с эффектом памяти формы.

Для успешного внедрения биметаллов с эффектом памяти формы необходимо провести всестороннее исследование их свойств. В результате сварки взрывом материал испытывает интенсивные пластические деформации, что приводит к изменению структуры и функциональных свойств биметаллического композита. В работах [11-12] были исследованы структура и параметры мартенситных превращений в биметаллах с эффектом памяти формы непосредственно после сварки взрывом, а так же после различной термообработки. Было показано, что сварка взрывом позволяет получить прочное соединение без каких-либо вторичных фаз, однако в результате интенсивного пластического деформирования происходит частичное подавление мартенситных превращений. Так же было показано, что кинетика мартенситных превращений восстанавливается вследствие отжига композита.

Исследование функциональных свойств биметаллов «TiNi-TiNi» и «TiNi-сталь», полученных сваркой взрывом, проведенное в [13-14] показало, что биметаллические композиты с эффектом памяти формы могут быть использованы в качестве термомеханических актуаторов, поскольку предварительно деформированные композиты самопроизвольно меняют форму в результате нагрева и охлаждения. Было показано, что соотношение толщин

слоев биметалла и величина предварительной деформации существенно влияют на величину обратимой деформации и могут быть использованы для управления функциональными свойствами биметаллических композитов с памятью формы.

Хотя исследование биметаллических композитов «TiNi-сталь» и «TiNi-TiNi», полученных сваркой взрывом показало, что такие биметаллические пластины проявляют обратимое изменение деформации, максимальная обратимая деформация, достигнутая в изученных материалах, не превосходила 1%. Известно, что поведение термомеханических актуаторов определяется способностью упругого элемента аккумулировать упругую энергию при реализации в функциональном слое эффекта памяти формы. Поэтому можно заключить, что малое значение обратимой деформации, которое было обнаружено в «TiNi-сталь» и «TiNi-TiNi» обусловлено малой упругой деформацией пассивного слоя, поэтому для получения биметаллических композитов, способных проявлять обратимую деформацию более 1%, необходимо использовать в качестве пассивного слоя сплавы с большей упругой деформацией и меньшим упругим модулем, тогда при одних и тех же напряжениях, упругая деформация пассивного слоя будет больше, а значит больше будет и обратимая деформация всего композита. Анализ имеющихся материалов показал, что к таким сплавам можно отнести титановый сплав Вt6 и бериллиевую бронзу БрБ2.

Однако композиты «TiNi – Вt6» и «TiNi-БрБ2» не были получены до настоящего времени, поэтому влияние пластической деформации и отжига на изменение структуры и свойств этих биметаллических композитов не изучены.

Глава 2. Цели и методики работы

2.1. Цели исследования

Анализ данных литературы [7] показал, что одним из перспективных применения сплавов с памятью формы являются термомеханические приводы многократного действия. При изменении температуры эти устройства способны многократно обратимо изменять деформацию и усилия [5]. Обычно термомеханические приводы состоят из двух элементов – активного сплава с памятью формы и пассивного упругого элемента [5]. При создании таких устройств необходимо решить ряд технических задач связанных с соединением двух разнородных тел, обеспечением одинаковых условий изменения температуры для активного и пассивного слоев, компактностью устройства. Все эти проблемы могут быть решены, если термомеханический привод создан на базе биметаллического композита, один из слоев которого является сплавом с памятью формы, а другой – упругим телом. Таким образом, один элемент содержит в себе одновременно и активный и пассивный слои. Получают такие композиты сваркой взрывом и к настоящему моменту уже получены композиты на основе сплава с памятью формы TiNi, в которых в качестве пассивного слоя выступали сталь и сплав TiNi никеленного состава, проявляющий псевдоупругие свойства. В работах [11-14] показано, что эти композиты могут обратимым образом менять деформацию и усилия при изменении температуры. Вместе с тем, установлено, что основным недостатком этих композитов является то, что величина обратимой деформации не превосходит 1 %, тогда как в обычных приводах это значение может достигать 5 -10 %. Поэтому очень актуальной задачей является разработка биметаллических композитов с памятью формы, которые способны проявлять обратимую деформацию большую, чем 1 %. Поскольку обратимое изменение деформации биметаллического композита определяется параметрами упругого слоя, то логично предположить, что использование в качестве пассивного слоя сплавов с

большей упругой деформацией позволит получить композиты с большей обратимой деформацией. Анализ упругих свойств большого количества различных сплавов показал, что наиболее оптимальными являются бериллиевая бронза и сплав ВТ6. Однако композиты с памятью формы, в которых в качестве пассивного слоя были выбраны эти два сплава, до сих пор не были разработаны, а их свойства не были исследованы. Поэтому целью работы явилось изучение структуры, мартенситных превращений и обратимого формоизменения в новых композитах «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6». Для того чтобы решить поставленную цель необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние сварки взрывом на структуру слоев биметаллических композитов «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6».
2. Изучить влияние сварки взрывом и последующего отжига на параметры мартенситных переходов в композитах «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6»
3. Изучить влияние предварительной деформации на обратимое формоизменение в биметаллических композитах «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6».

2.2. Объекты и методики исследования

Объектами исследования выбраны биметаллические композиты «TiNi-ВТ6» и «TiNi-БрБ2», полученные сваркой взрывом. Химический состав пластин, входящих в состав композита, представлен в таблице 1. После сварки взрывом размеры пластин составляли 50x150xh мм, где h была различной для различных композитов (2,22 мм – для композита «TiNi-ВТ6» и 1,7 мм для композита «TiNi-БрБ2»). Размеры образцов представлены в таблице 2.

Таблица 1. Химический состав пластин, входящих в состав биметаллического композита.

Слой	Химический состав
TiNi	50 ат. % Ti, 50 ат. % Ni
ВТ6	90 мас. % Ti, 6 мас. % Al, 4 мас. % V
БрБ2	97,5 мас. % Cu, 2 мас. % Be, ..0,5 мас. % Ni.

Для исследования микроструктуры поперечного сечения композитов использовали образцы сечением 3x3 мм, вырезанные из основной пластины с помощью метода электроэрозионной резки. Образцы заливали в эпоксидную смолу и после затвердевания смолы, подвергали шлифовке и полировке на установке Buehler для того чтобы получить металлографические шлифы.

Параметры мартенситных переходов в композите после сварки взрывом и термообработки были исследованы методом дифференциальной сканирующей калориметрии в калориметре Mettler Toledo 822e при охлаждении и нагревании образцов размером 3x3xhмм, в интервале температур от 140°C до -100°C со скоростью изменения температуры 10°C/мин. Температуры мартенситных превращений были определены методом секущих по калориметрическим кривым.

Для изучения влияния термообработки на структуру материала образцы подвергали отжигу при температурах 400°C-600°C в течение 1 часа. Структура композитов без термообработки и после термообработки была изучена

методами оптической и электронной сканирующей микроскопии. Сканирующая электронная микроскопия была проведена с использованием оборудования CarlZeissMerlinfieldemission SEM на базе междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» СПбГУ. Для обработки изображений, полученных методами оптической и электронной микроскопии, была использована программа ImageExpertPro.

Распределение микротвердости на металлографических шлифах в направлении перпендикулярном сварному шву было изучено по Виккерсу при нагрузке $P=0,98$ Н на установке Buehler Micromet 5103.

Таблица 2. Размеры образцов, использованных для исследования функциональных свойств.

Образец	Ширина, мм	Толщина, мм	$h_{\text{TiNi}}/h_{\text{общ.}}$
TiNi – БрБ2			
образец №1	4,76	0,87	0,60
образец №2	3,96	2,2	0,65
TiNi-BT6			
образец №1	5,7	1,08	0,65
образец №2	6	1,08	0,65

Функциональные свойства изучали на установке Shimadzu AG50, оснащенной криотермокамерой. В ходе эксперимента образец деформировали методом трех-точечного изгиба (длина базы $L=15$ мм) при температуре, при которой слой сплава TiNi находился в мартенситной фазе, разгружали и нагревали до температуры 100°C (выше A_k), для того чтобы реализовать эффект памяти формы. Далее образцы охлаждали и нагревали в интервале температур $100^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ чтобы изучить обратимое деформирование биметаллических образцов. При деформировании образцы располагали таким образом, чтобы слой TiNi растягивался в процессе трех-точечного изгиба, поскольку степень восстановления формы в сплаве TiNi, подвергнутом предварительному

растяжению, выше, чем после сжатия [5]. Функциональные свойства изучали на композитах, которые после сварки взрывом были подвергнуты отжигу при температурах 400 и 500 °С в течение 2-х часов.

Глава 3. Результаты исследований

3.1. Исследование структуры биметаллических композитов «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза»

На рис. 8 представлены фотографии поперечного сечения биметаллических композитов, полученные в оптическом микроскопе. Видно, что в обоих композитах шов имеет волнообразную форму, каких-либо макродефектов или трещин не наблюдается. Это говорит о том, что сваркой взрывом можно достигнуть прочного соединения TiNi с другими сплавами.

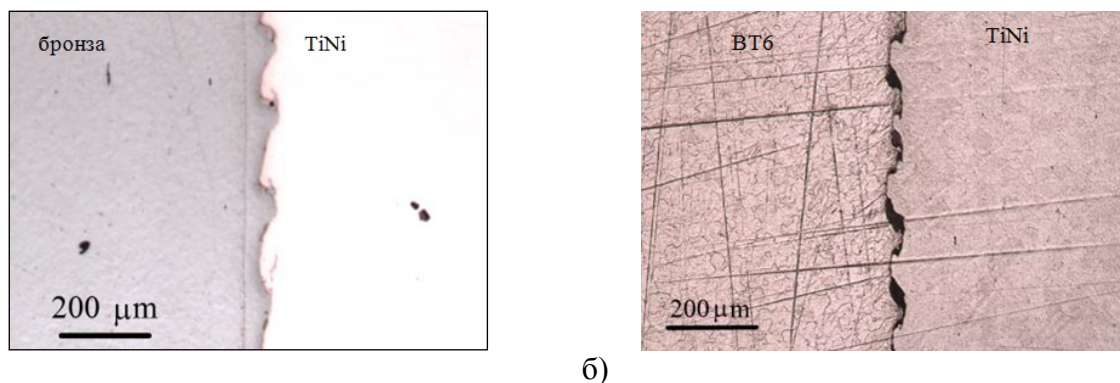


Рис.8 Изображения поперечного сечения биметаллических композитов «TiNi-бронза» (а) и «TiNi-BT6» (б), полученные методом оптической микроскопии.

Как было показано в работах [11-12] сварка взрывом приводит к накоплению в композите пластической деформации, как следствие происходит подавление мартенситных превращений и ухудшение функциональных свойств. Поскольку за функциональные свойства отвечает слой TiNi, необходимо исследовать структуру этого слоя вблизи и вдали от сварного шва. На рис.9 представлены изображения слоя TiNi в композитах «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза», полученные в электронном сканирующем микроскопе. Видно, что как вблизи, так и вдали от шва наблюдаются зерна близкие к равноосным со средним размером зерна около 20мкм. Такая гомогенная структура означает, что слой TiNi не подвергся значительной пластической деформации в процессе сварки взрывом.

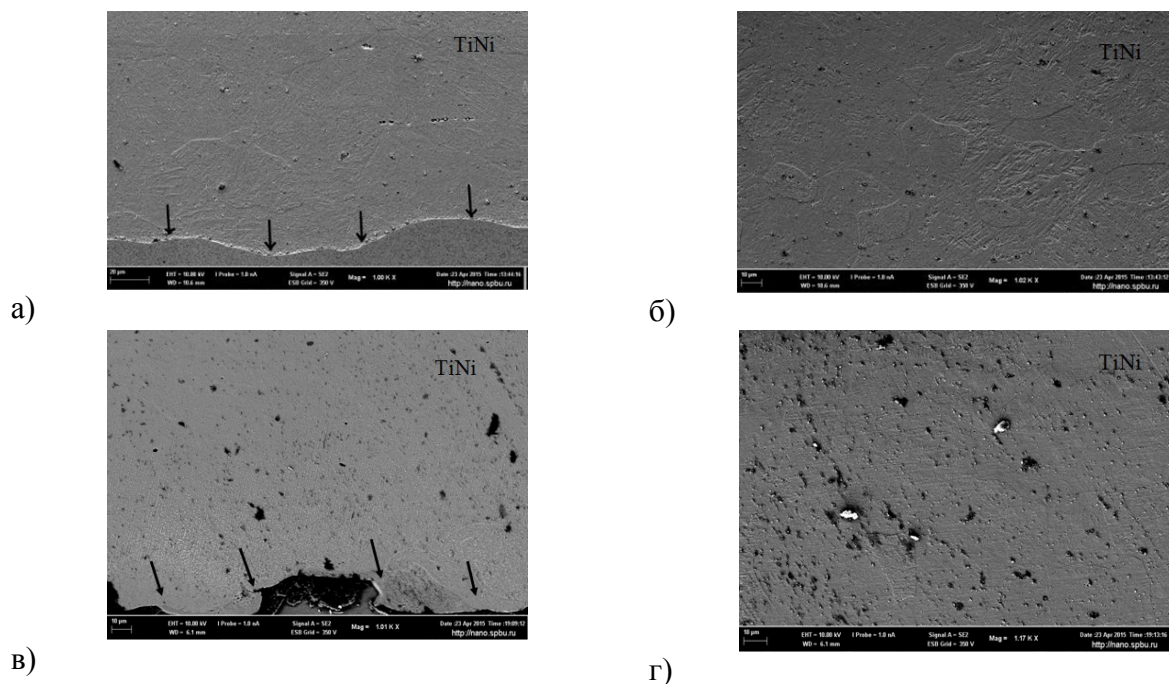


Рис.9 Изображения поперечного сечения слоя TiNi в биметаллических композитах «TiNi-бронза» (а, б) и «TiNi-ВТ6» (в, г), полученные в электронном сканирующем микроскопе вблизи шва (а, в) и вдали от шва (б, г). Стрелками показан шов.

Для того чтобы изучить переходную область и изменение концентрации химических элементов в этой области, было проведено исследование изменения химического состава биметаллических композитов в направлении перпендикулярном шву (Рис. 10, 11). Полученные результаты показали, что в обоих композитах наблюдается промежуточный слой (зона перемешивания)

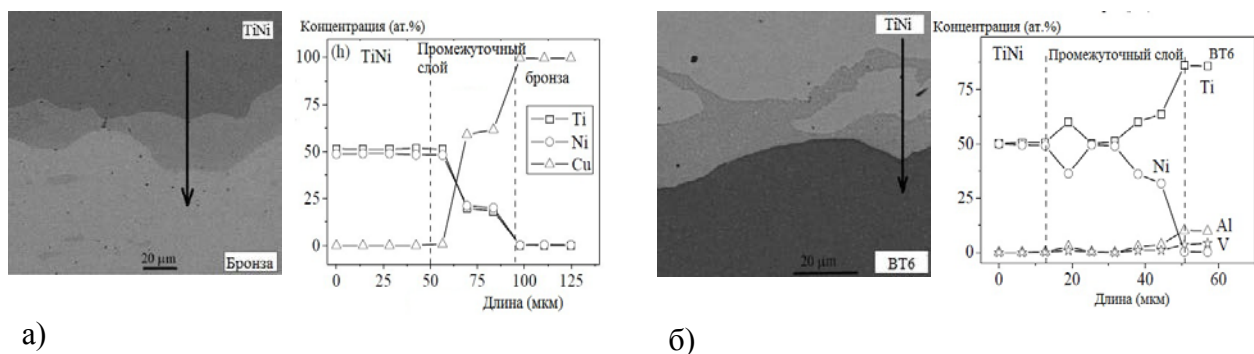
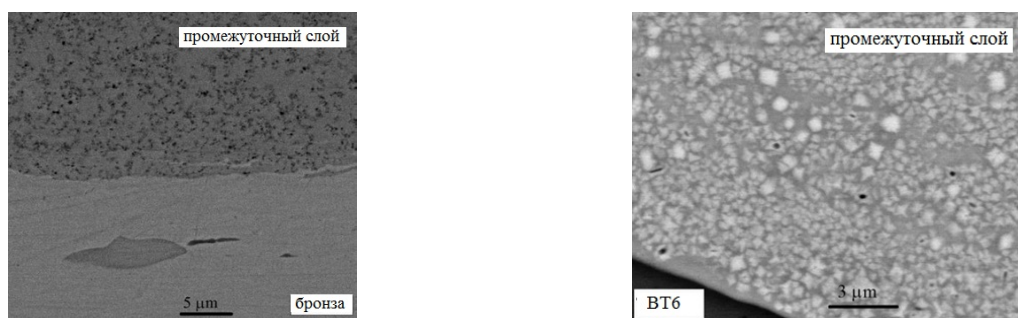


Рис.10 Распределение химических элементов в направлении, указанном стрелкой, в биметаллических композитах «TiNi-бронза» (а), «TiNi-ВТ6» (б)

размером примерно 40 мкм. Вне зоны перемешивания концентрация химических элементов постоянна, при этом ни в одном из слоев вторичные фазы не появляются. В композите «TiNi-бронза» (рис.10 а) в промежуточном слое происходит уменьшение концентраций Ti и Ni и увеличение концентрации Cu. В биметалле «TiNi-BT6» (рис.10 б) концентрации химических элементов изменяются немонотонно. В начале зоны перемешивания происходит увеличение концентрации Ti и уменьшение концентрации Ni, к середине промежуточной зоны концентрации этих элементов становятся одинаковыми, а ближе к слою BT6 снова происходит уменьшение концентрации Ni и увеличение концентрации Ti. При этом на протяжении всей зоны перемешивания происходит возрастание концентраций Al и V.



а)

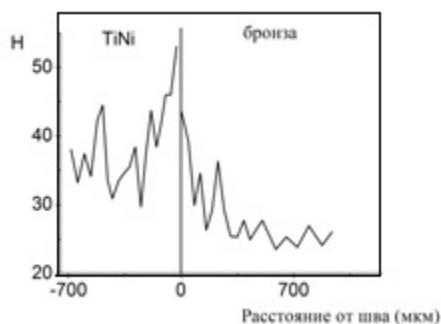
б)

Рис.11 Изображения, полученные в электронный микроскоп, промежуточного слоя биметаллических композитов «TiNi-бронза» (а), «TiNi-BT6» (б)

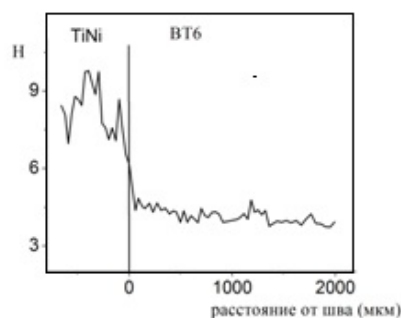
Исследование зон перемешивания было проведено более подробно. На рис. 11 видно, что зона перемешивания в композите «TiNi-бронза» (рис.11 а) состоит из матрицы серого цвета и внедренных в нее темных частиц размером 100-200 нм. Исследование показало, что серая матрица – это твердый раствор Ti-Ni-Cu, а темные частицы – фаза TiCu. В биметалле «TiNi-BT6» (рис.11 б) зона смешивания представляет собой серую матрицу с белыми частицами размером 200-600 нм, где серая матрица - это твердый раствор Ti-Ni-Al-V, а белые области – кристаллы фазы $Ti_{50}Ni_{50}$.

Таким образом, можно предположить, что энергия сварки взрывом расходуется на формирование зоны смешивания между слоями – образования твердого раствора и интерметаллидных фаз (TiCu или TiNi), а не на пластическое деформирование слоев.

На рис.12 представлены результаты исследования распределения микротвердости в направлении, перпендикулярном сварному шву, полученные в композитах после сварки взрывом. Видно, что значение микротвердости в композите « TiNi -бронза» после сварки взрывом (без термообработки) достигает максимума в области сварного шва и уменьшается по мере удаления от него (Рис. 12 а). В то время, как в композите « TiNi -ВТ6» значение микротвердости в слое TiNi значительно больше, чем в слое ВТ6 (рис.12 б). Увеличение микротвердости в области сварного шва в биметалле « TiNi -бронза» обусловлено тем, что наличие интерметаллидных частиц TiCu размером 100 – 200 нм приводит к упрочнению твердого раствора. С другой стороны частицы фазы TiNi размером 200 – 600 нм в биметалле « TiNi -ВТ6» не оказывают дополнительного влияния на изменение микротвердости. Различие в значениях микротвердости слоев TiNi и ВТ6 обусловлено различными пластическими свойствами данных материалов.



а)



б)

Рис.12 Распределение микротвердости в направлении, перпендикулярном сварному шву в биметаллических композитах « TiNi -бронза» (а) и « TiNi -ВТ6» (б)

Таким образом, результаты исследования структуры показали, что сварка взрывом позволяет получить прочное соединение слоев биметаллических композитов «TiNi-VT6» и «TiNi-бронза» без образования каких-либо трещин или дефектов. При этом энергия сварки взрывом расходуется на образование в биметаллах зоны перемешивания, а слой TiNi не подвергается интенсивному пластическому деформированию.

3.2. Мартенситные превращения в биметаллических композитах.

Как показало исследование структуры биметаллов, сварка взрывом и последующий отжиг приводят к изменению структуры биметаллических композитов. Известно, что пластическая деформация и изменение размеров зерна оказывают существенное влияние на функциональные свойства слоя TiNi [11-12], поэтому необходимо исследовать параметры мартенситных превращений в биметаллических композитах «TiNi–BT6» и «TiNi–бронза» после сварки взрывом и после различной термообработки.

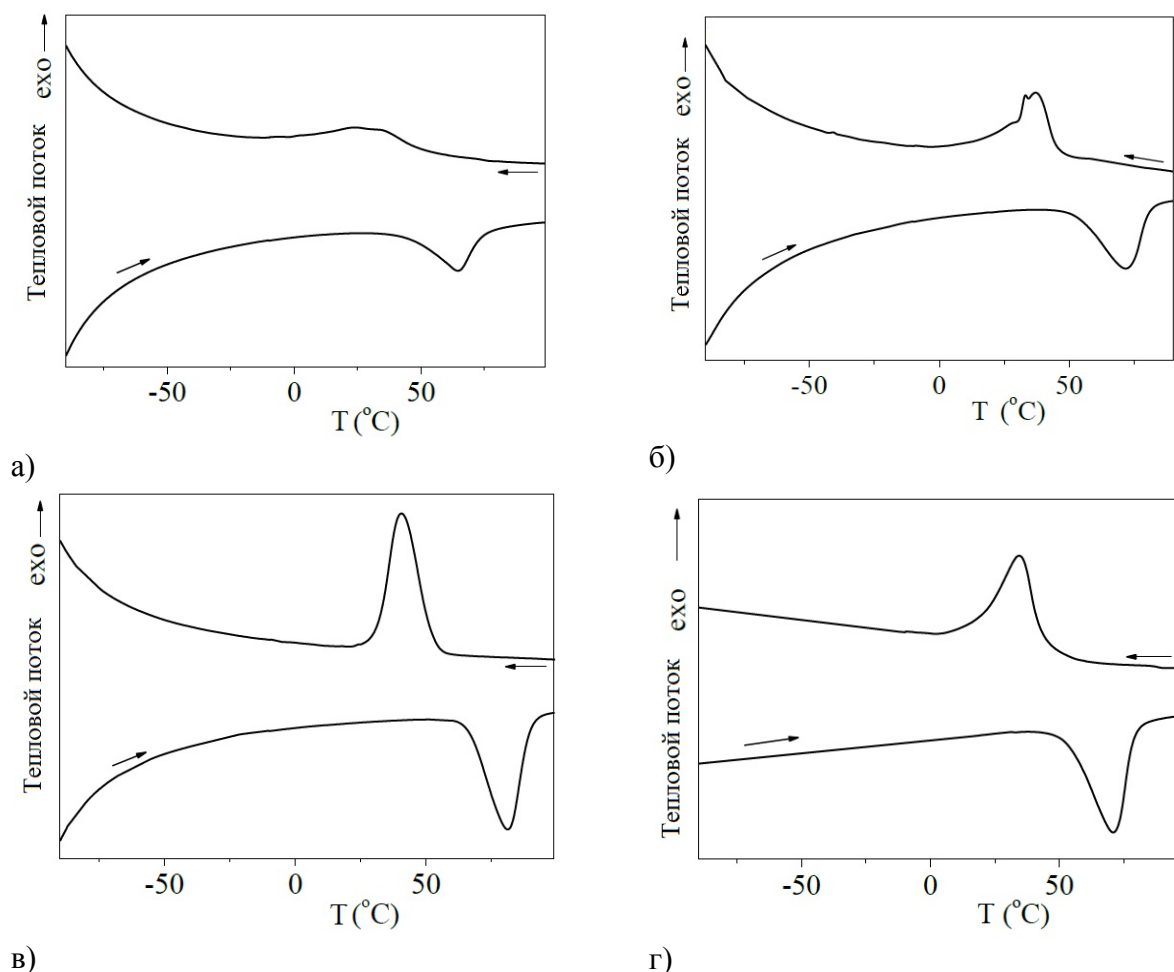


Рис.13 Калориметрические кривые, полученные при охлаждении и нагреве биметаллов «TiNi–бронза» (а, в) и «TiNi–BT6» (б, г) после сварки взрывом (а, б) и после термообработки (в, г)

На рис. 13 представлены калориметрические кривые, полученные в результате охлаждения и нагрева биметаллов «TiNi-бронза» и «TiNi-BT6». При охлаждении наблюдается пик выделения тепла, который соответствует прямому мартенситному превращению из кубической решетки типа B2 в моноклинную решетку типа B19'. При нагреве наблюдается пик поглощения тепла, соответствующий обратному мартенситному превращению B19'→B2. Температуры начала и окончания мартенситных переходов были определены по калориметрическим кривым методом секущих, а энергия, выделяемая при охлаждении и поглощаемая при нагреве, была вычислена как площадь под калориметрическими пиками. Параметры мартенситных превращений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры мартенситных превращений в биметаллических композитах до и после отжига.

Состав композита	Температура отжига, °C	M _н , °C	M _к , °C	A _н , °C	A _к , °C	E, Дж/г
TiNi-BT6	-	46	15	53	79	9
TiNi-BT6	500	49	24	59	85	10
TiNi-BT6	600	50	27	67	93	10
TiNi-БрБ2	-	54	-9	44	74	6
TiNi-БрБ2	600	53	31	66	90	12

Сравнивая параметры мартенситных превращений после сварки взрывом и после термообработки можно заметить, что биметаллы, подвергнутые отжигу, обладают более узкими температурными интервалами (A_к-A_н, M_н-M_к), в которых происходят мартенситные переходы. Такое изменение параметров мартенситных превращений может быть вызвано изменением структуры слоя «TiNi». Известно, что меньшему значению энергии, выделяемой/поглощаемой в результате охлаждения/нагрева биметаллического композита, соответствует меньший объем материала, испытывающий мартенситные превращения. Результаты исследования показали, что энергия, которая выделяется/поглощается в результате мартенситных превращений, в

композитах сразу после сварки взрывом меньше, чем в биметаллах, подвергнутых термообработке. Это говорит о том, что вследствие сварки взрывом часть слоя «TiNi» не испытывает мартенситные превращения, однако отжиг приводит к восстановлению функциональных свойств слоя «TiNi» и увеличению доли материала, испытывающего мартенситные переходы.

Стоит заметить, что после отжига энергия, выделяемая/поглощаемая в биметаллическом композите «TiNi-BT6», практически не меняется, в то время как в композите «TiNi-бронза» она возрастает в два раза. Кроме того, сдвиг температур прямого и обратного превращений в биметалле «TiNi-бронза» в область более высоких температур значителен, в отличие от аналогичного изменения температур, характерных для мартенситных превращений в композите «TiNi-BT6». Это говорит о том, что сварка взрывом оказывает более значительное влияние на биметаллический композит «TiNi-бронза», нежели на «TiNi-BT6». Уменьшение энергии, выделяемой/поглощаемой в результате мартенситных превращений, сдвиг температур прямого и обратного переходов, а так же увеличение температурного интервала могут быть следствием пластической деформации, развиваемой в слое «TiNi» [13].

Таким образом, сварка взрывом частично подавляет мартенситные превращения в слое «TiNi» в композите «TiNi-бронза», однако последующая термообработка приводит к восстановлению структуры материала, следовательно, восстанавливаются и мартенситные переходы. При этом сварка взрывом оказывает большее влияние на композит «TiNi-бронза», чем на композит «TiNi-BT6». Это объясняется тем, что энергия сварки взрывом расходуется на образование зоны смешивания и на накопление пластической деформации в композите «TiNi-бронза», в то время, как в биметалле «TiNi-BT6» - только на образование зоны смешивания.

3.3. Обратимая деформация в биметаллических композитах «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза».

3.3.1. Влияние предварительной деформации на обратимую деформацию в композитах «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза»

Для изучения функциональных свойств биметаллических композитов необходимо определить оптимальное соотношение толщин $h_{\text{TiNi}}/h_{\text{общ}}$, при котором величины обратимой деформации и эффекта памяти формы будут наибольшими. Расчет, проведенный по методике, представленной в работе [14], показал, что в том случае, если нейтральная линия совпадает со швом биметаллического композита, обратимая деформация максимальна. В этом случае, в режиме трех-точечного изгиба слой «TiNi» испытывает растяжение, а пассивный слой – сжатие. Известно, что степень восстановления формы в сплаве TiNi, подвергнутом предварительному растяжению, выше, чем после сжатия. Поэтому соотношение толщин, при котором весь слой «TiNi» работает на растяжение, является более выгодным. Согласно данной методике был проведен расчет, который показал, что оптимальное соотношение толщин для композита «TiNi-BT6» составляет $h_{\text{TiNi}}/h_{\text{общ}}=0,65$, а для биметалла «TiNi-бронза» эта величина равна $h_{\text{TiNi}}/h_{\text{общ}}=0,6$. Биметаллы с такими соотношениями толщин были выбраны для изучения влияния предварительной деформации на обратимую деформацию композитов.

На рисунке 14 представлены зависимости $\varepsilon(T)$, полученные при нагревании и охлаждении биметаллического композита «TiNi-BT6», предварительно деформированного до различной деформации в мартенситном состоянии. Видно, что при нагреве происходит возврат деформации – реализация эффекта памяти формы, а при последующем охлаждении – накопление обратимой деформации. В случае предварительной деформации $\varepsilon_{\text{предв}}=1\%$ (рис. 14 а) в результате нагрева происходит полное восстановление

первоначальной формы композита, а при последующем охлаждении накапливается обратимая деформация, превышающая величину эффекта памяти формы и равная предварительной деформации. При предварительной деформации равной 3 % (рис. 14 б) в результате реализации эффекта памяти формы возвращается не вся деформация, но при охлаждении, как и в случае $\varepsilon_{\text{предв}}=1\%$ накапливается больше деформации, чем восстановилось при первом нагреве. В случаях $\varepsilon_{\text{предв}}=5\%$ и $\varepsilon_{\text{предв}}=7\%$ (рис. 14 в, г) при первом нагреве не происходит полного восстановления формы, а при охлаждении накапливается обратимая деформация, величина которой меньше величины эффекта памяти формы.

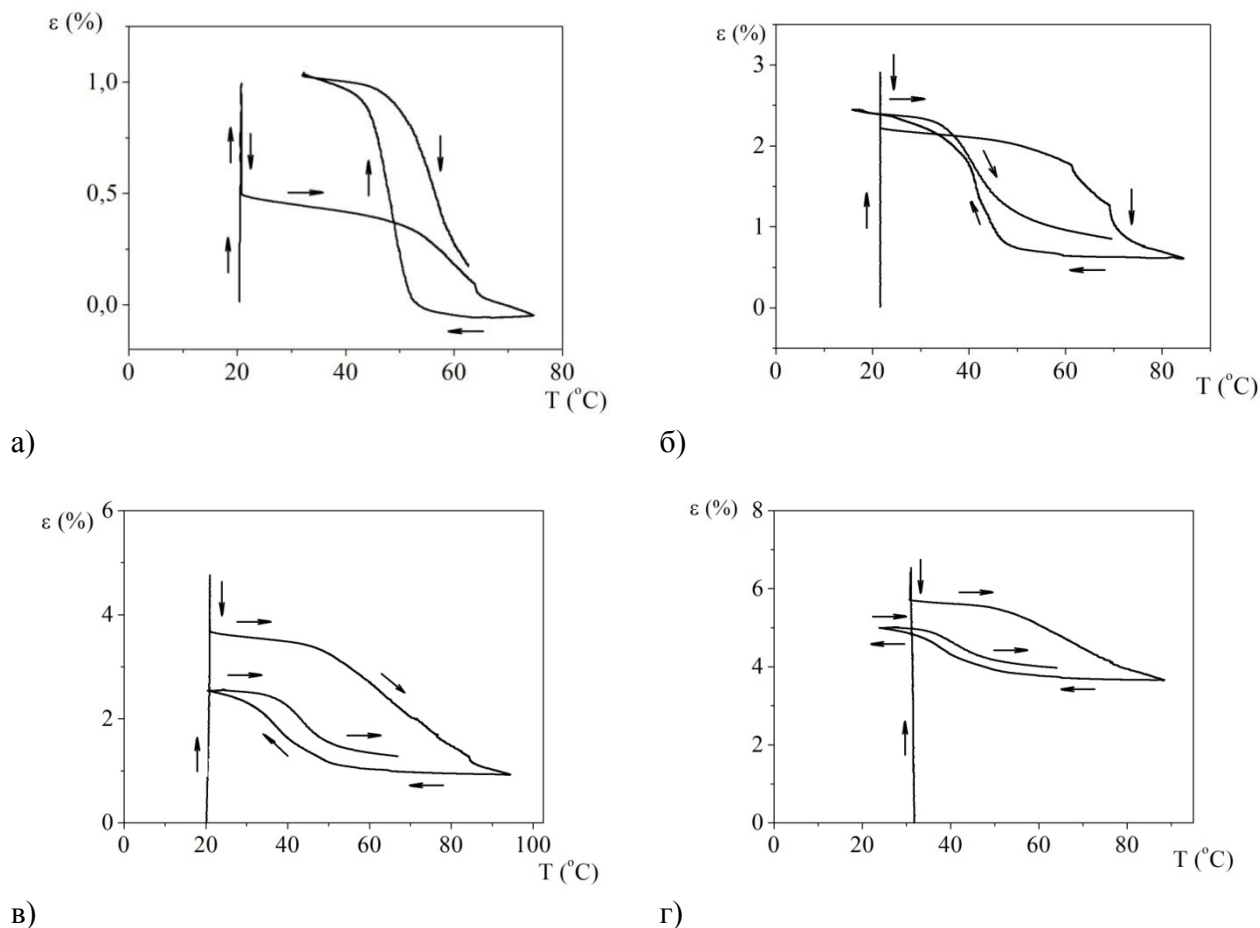
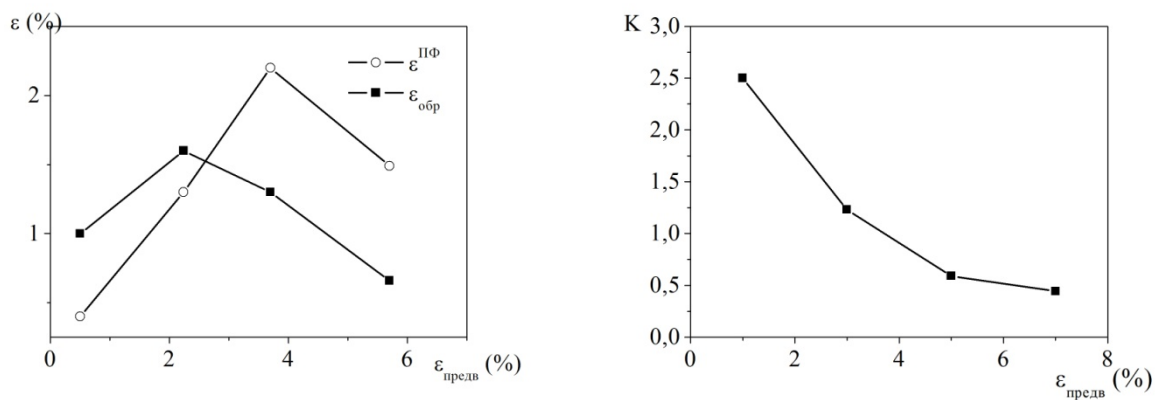


Рис.14 Изменение деформации при нагревании и последующем термоцикле биметаллического композита «TiNi-BT6», подвергнутого предварительной деформации 1% (а), 3% (б), 5% (в) и 7%(г)

Таким образом, в случаях $\varepsilon_{\text{предв}}=1\%$ и $\varepsilon_{\text{предв}}=3\%$ биметаллический композит «TiNi-BT6» накапливает при охлаждении обратимую деформацию, превышающую по величине эффект памяти формы, что никогда ранее не наблюдалось для биметаллов с памятью формы, в которых в качестве пассивного слоя были выбраны сталь или сплав TiNi [13-14]. Однако при $\varepsilon_{\text{предв}} \geq 5\%$ зависимости $\varepsilon(T)$ для биметалла «TiNi-BT6» становятся такими же, как и для изученных ранее биметаллических композитов [13-14].

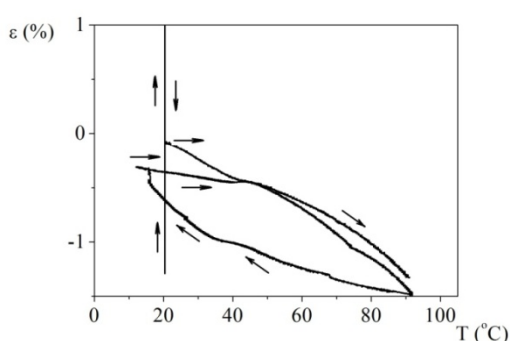
По данным, представленным на рисунке 14 были определены величины эффекта памяти формы (деформация, вернувшаяся при первом нагреве предварительно деформированного образца), обратимой деформации, наблюдаемой при последующем термоциклировании, и коэффициент $K = \varepsilon_{\text{обр}} / \varepsilon_{\text{ост}}$, показывающий какую долю составляет обратимая деформация от остаточной. Зависимости этих параметров от величины предварительной деформации, определенные для композита «TiNi-BT6», представлены на рисунке 15.



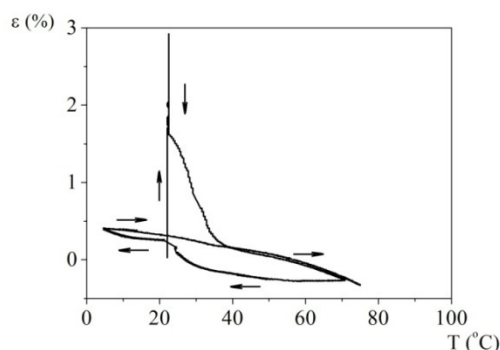
а) б)
Рис.15 Зависимости обратимой деформации и величины эффекта памяти формы (а) и коэффициента K (б) от величины предварительной деформации, полученные в биметаллическом композите «TiNi-BT6»

Видно, что зависимости величины эффекта памяти формы и обратимой деформации от предварительной деформации являются немонотонными и максимум наблюдается при предварительной деформации 4 % для величины

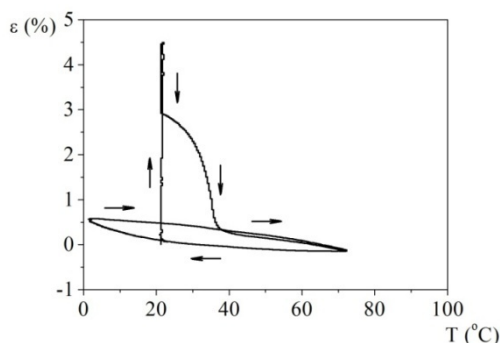
эффекта памяти формы и 2 % - для обратимой деформации. При этом если предварительная деформации оказывается меньше 3 %, то величина обратимой деформации больше величины эффекта памяти формы. Накопление обратимой деформации связано с внутренними напряжениями в композите, которые возникают из-за деформирования упругого слоя. В большинстве биметаллов реализация эффекта памяти формы приводит к деформированию упругого слоя и накоплению внутренних напряжений, для таких материалов коэффициент восстановления меньше 0,5. Исследование композита «TiNi-BT6» показало, что при $\varepsilon_{\text{предв}} \leq 3\%$ коэффициент восстановления больше 1, из этого можно сделать вывод, что накопление внутренних напряжений в биметалле происходит не только в результате реализации эффекта памяти формы, но и на этапе разгрузки после предварительного деформирования.



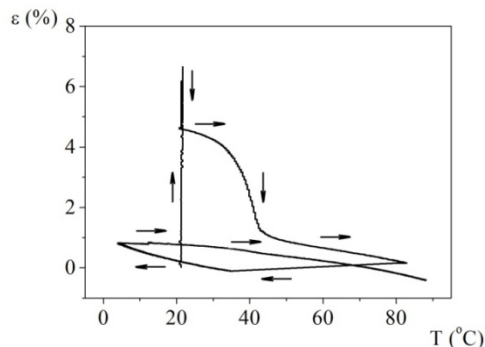
а)



б)



в)



г)

Рис.16 Изменение деформации при нагревании и последующем термоцикле биметаллического композита «TiNi-бронза», подвергнутого предварительной деформации 1% (а), 3% (б), 5% (в) и 7% (г)

На рисунке 16 представлены зависимости деформации от температуры, полученные для биметаллического композита «TiNi-бронза», подвергнутого разной предварительной деформации. Видно, что в случае предварительной деформации равной 1 % (рис. 16 а) восстановление формы происходит при разгрузке, что означает, что биметалл деформируется упруго. Изменение деформации при последующем термоциклировании объясняется температурным расширением композита. При $\varepsilon_{\text{предв}}=3\%$ и $\varepsilon_{\text{предв}}=5\%$ (рис. 16 б, в) наблюдается реализация эффекта памяти формы при нагреве, однако при последующем охлаждении не происходит накопления обратимой деформации. В случае предварительной деформации равной 7 % (рис. 16 г) при нагреве наблюдается восстановление деформации, а при последующем охлаждении ее накопление, при этом величина обратимой деформации мала по сравнению с величиной эффекта памяти формы.

Таким образом, в биметаллическом композите «TiNi-бронза» обратимая деформация наблюдается только при $\varepsilon_{\text{предв}}=7\%$, однако величина этого эффекта мала даже по сравнению с величиной обратимой деформации, наблюдаемой в композите «TiNi-ВТ6» после предварительного деформирования на 1 %.

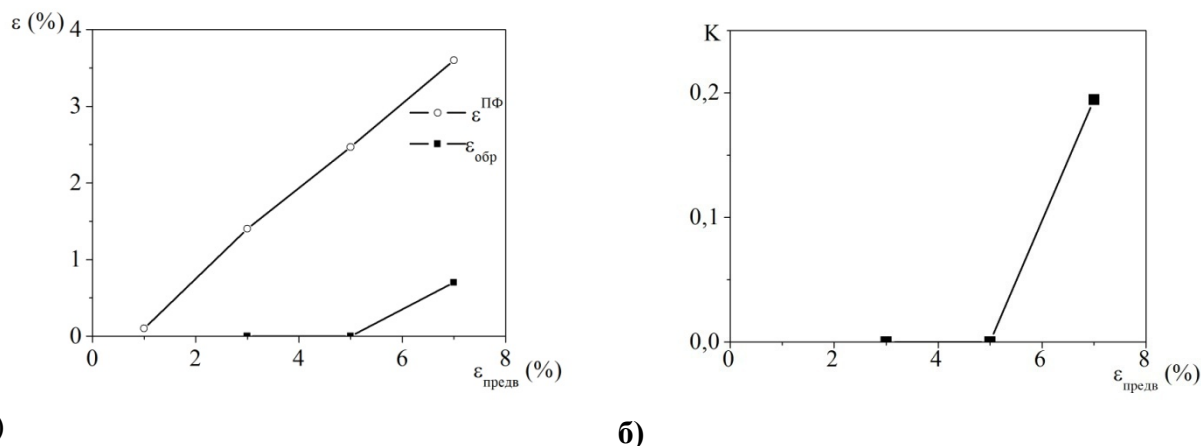


Рис.17 Зависимости обратимой деформации, памяти формы (а) и коэффициента К (б) от величины предварительной деформации, полученные в биметаллическом композите «TiNi-бронза».

В композите «TiNi-бронза» (рис. 17 а) с увеличением предварительной деформации растет величина эффекта памяти формы, при этом обратимая деформация не наблюдается, если предварительная деформация оказывается равной 5 % и меньше. Из этого можно сделать вывод, что высокие упругие свойства бронзового слоя препятствуют реализации эффекта памяти формы в слое TiNi, поскольку в этом слое реактивных напряжений не достаточно для деформирования упругого слоя бронзы. Поскольку деформирование упругого слоя минимально, то и величина внутренних напряжений, которые накапливаются в композите, не велика и ее не достаточно для того, чтобы инициировать изменение обратимой деформации в слое TiNi. Увеличение предварительной деформации приводит к увеличению реактивного напряжения, которое способствует реализации эффекта памяти формы. Как результат, величина эффекта памяти формы возрастает, ровно, как и внутренние напряжения. Однако для того чтобы этих напряжений было достаточно для обратимого изменения в биметаллическом композите, необходимо продеформировать композит «TiNi-бронза» более, чем на 5 %.

Полученные данные показали, что высокие упругие свойства бериллиевой бронзы препятствуют появлению обратимой деформации в биметаллическом композите. Напротив, в композите «TiNi-BT6» наличие слоя BT6 способствует появлению внутренних напряжений не только на стадии нагревания образца, но и на стадии предшествующей разгрузки. Это приводит к тому, что обратимая деформация возрастает многократно и превосходит величину эффекта памяти формы при малых предварительных деформациях. Оптимальной предварительной деформацией, при которой величина обратимой деформации максимальна, для биметалла «TiNi-бронза» является $\varepsilon_{предв} \geq 6$ %. В композите «TiNi-BT6» максимальная обратимая деформация 1,5 % наблюдается при $\varepsilon_{предв} \sim 2$ %.

3.3.2. Влияние упругого слоя на обратимую деформацию композитов «TiNi-BT6» и «TiNi-бронза»

На рис. 18 представлена зависимости коэффициента $K = \frac{\varepsilon_{обр}}{\varepsilon_{ПФ}}$ от величины предварительной деформации, полученные для двух композитов с различным материалом упругого слоя. Видно, что для биметалла «TiNi-бронза» этот коэффициент возрастает с увеличением величины предварительной деформации, а для композита «TiNi-BT6» он убывает с ростом значения предварительной деформации, однако, значение коэффициента K для биметалла «TiNi-BT6» значительно превосходит значение этого коэффициента для композита «TiNi-бронза».

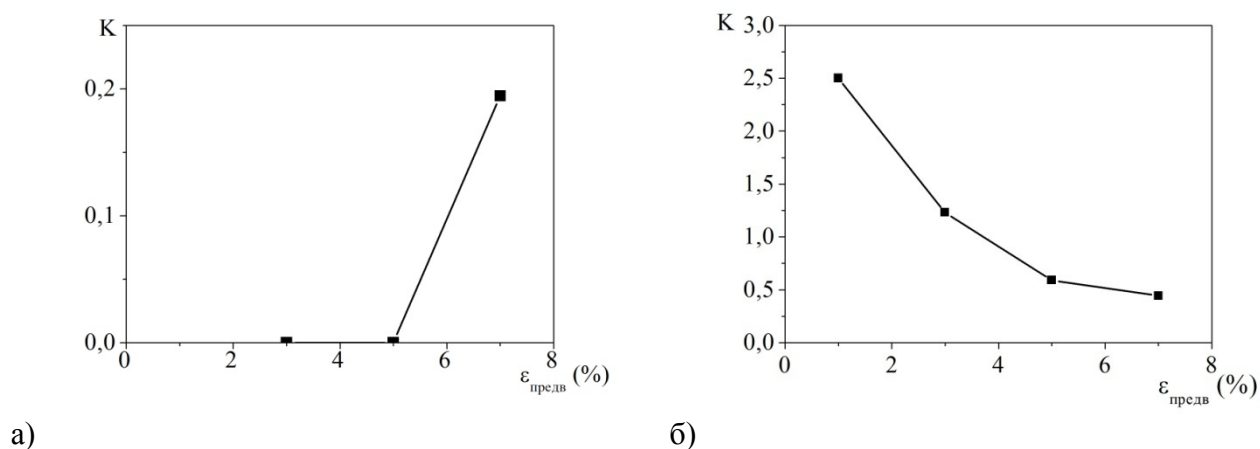


Рис.18 Зависимость коэффициента $K = \frac{\varepsilon_{обр}}{\varepsilon_{ПФ}}$ от величины предварительной деформации для композитов «TiNi-бронза» (а) и «TiNi-BT6» (б)

Исследование влияния упругого слоя на функциональные свойства биметалла показало, что в биметаллическом композите, в котором в качестве упругого слоя выбрана бронза, не наблюдается обратимой деформации при небольших значениях предварительной деформации. В случаях, когда значение предварительной деформации больше 5 %, такие композиты проявляют те же свойства, что и ранее рассмотренные биметаллы.

Биметаллический композит «TiNi-BT6» проявляет необычные свойства при небольших значениях предварительной деформации: величина обратимой деформации превосходит величину эффекта памяти формы примерно в 2 раза. При больших предварительных деформациях биметалл «TiNi-BT6» проявляет качественно те же свойства, что и «TiNi-сталь», «TiNi-бронза», «TiNi-TiNi» [13-14], хотя величина обратимой деформации, накапливаемой при охлаждении композита «TiNi-BT6», превосходит ту же величину, характерную для других биметаллов с эффектом памяти формы.

Таким образом, можно заключить, что из всех изученных биметаллических композитов с памятью формы наилучшим следует считать композит «TiNi-BT6» потому что при небольших значениях предварительной деформации данный биметалл обладает обратимой деформацией превышающей величину эффекта памяти формы или сравнимой с ней, что делает этот композит более выгодным для применения.

Выводы

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Сварка взрывом приводит к образованию промежуточного слоя между активным и пассивным слоем в композитах «TiNi - бронза» и «TiNi – ВТ6». В композите «TiNi - бронза» этот слой состоит из твердого раствора и частиц фазы TiCu, в композите «TiNi – ВТ6» промежуточный слой состоит из твердого раствора и частиц фазы TiNi. Образование промежуточного слоя препятствует изменению морфологии зерен в слое TiNi вблизи сварного шва в процессе сварки.
2. Сварка взрывом не оказывает существенного влияния на параметры мартенситного перехода и объем слоя TiNi, который этот переход претерпевает, в композите «TiNi – ВТ6». В композите «TiNi - бронза» сварка взрывом частично подавляет мартенситные превращения в слое TiNi, что обусловлено высокой пластической деформацией. Последующий отжиг восстанавливает параметры мартенситных переходов в слое TiNi.
3. В биметаллическом композите «TiNi - бронза» величина обратимой деформации составляет 0,5 % и проявляется только после предварительного деформирования до деформации более 5 %.
4. В биметаллическом композите «TiNi – ВТ6» величина обратимой деформации превосходит величину эффекта памяти формы, если величина предварительной деформации меньше 3,5 %, что никогда ранее не наблюдалось в сплавах с памятью формы и в термомеханических приводах, созданных с использованием этих сплавов. Так, обратимая деформация 1 % может быть получена в биметаллическом композите «TiNi – ВТ6» предварительно деформированном всего на 1 %. Увеличение предварительной деформации приводит к немонотонному изменению обратимой деформации в композите «TiNi – ВТ6» и максимальное значение обратимой деформации 1,5 % наблюдается в композите, предварительно деформированном на 2 %.

5. Из всех изученных биметаллических композитов с памятью формы наилучшим следует считать композит «TiNi-ВТ6», потому что сварка взрывом практически не оказывает влияния на структуру и свойства данного композита и он способен проявлять обратимую деформацию, превышающую величину эффекта памяти формы или сравнимую с ней при небольших значениях предварительной деформации, что делает этот композит наиболее перспективным для применения.

Список использованной литературы

- [1] Лихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменцева З. П. Эффект памяти формы - Издательство ленинградского университета, 1987
- [2] Хунджуа А.Г. Эффект памяти формы и сверхупругость - М.: Физический факультет МГУ, 2010
- [3] Пушин В. Г., Прокошкин С. Д., Валиев Р. З. и др. Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч.I. Структура, фазовые превращения и свойства - Екатеринбург: УрО РАН, 2006
- [4] Хачин В. Н., Пушин В. Г., Кондратьев В. В. Никелид титана: Структура и свойства - М.: Наука, 1992
- [5] Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. Shape memory alloys: Fundamental, Modeling and Applications - Quebec: Ecole da TechnologieSuperieure, 2003
- [6] Лихачев В. А. Эффект памяти формы – Соросовский образовательный журнал, 3, 1997 - 107-114
- [7] Otsuka K., Wayman C. M. Shape memory materials - Cambridge University Press, 1998
- [8] Odd M. Akselsen Joining of shape memory alloys, Shape memory alloy/ed. Corneliu Cismasiu, 2010 - 183-208
- [9] Crossland B. Review of the present state-of-the-art in explosive welding – Metals Technology, 1976 - 8-20
- [10] Findik F. Recent developments in explosive welding - Materials and Design 32, 2011 - 1081-1093
- [11] Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В.мл., Ломакин И.В. Мартенситные превращения и обратимая деформация в биметаллическом композите $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ – $Ti_{50}Ni_{50}$ - Вестник тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 18, 2013 – 20-29

- [12] Belyaev S., Rubanik V., Resnina N., Rubanik V.Jr., Rubanik O., Borisov V. Martensitic transformation and physical properties of “steel-TiNi” bimetal composite, produced by explosion welding - Phase Transitions, 83, 2010 - 276-283
- [13] Belyaev S., Rubanik V., Resnina N., Rubanik V.Jr., Rubanik O., Borisov V., Lomakin I. Functional properties of bimetal composite of “stainless steel – TiNi alloy” produced by explosion welding - Physics Procedia, 10, 2010 - 52-57
- [14] Belyaev S., Rubanik V., Resnina N., Rubanik V.Jr., Lomakin I. Functional properties of “ $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ – $\text{TiNi}_{49.3}\text{Ni}_{50.7}$ ” shape memory composite produced by explosion welding - Smart Materials and Structures 23, 2014 - 1-8